2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

Artículos

Políticas de operación óptima por medio de cómputo evolutivo y algoritmo gradiente reducido generalizado: Presa Cointzio, Michoacán, México

Obtaining optimal operation rules by means of evolutionary computation and GRG algorithms: Cointzio Dam, Michoacán, Mexico

Luis Daniel Padilla-Morales[1]

Maritza Liliana Arganis-Juárez[2], ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1429-1243

Rosalva Mendoza-Ramírez[3], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4440-2971

Ramón Domínguez-Mora[4], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2321-6408

Eliseo Carrizosa-Elizondo[5], ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8730-8590

Josué Rojas-Flores[6]

Aníbal Sol-Benítez[7]

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

[1]Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Ciudad de México, México, padilax360@hotmail.com

[2]Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Circuito Escolar, Ciudad de México, México, MArganisJ@iingen.unam.mx

[3]Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Campus Morelia, Morelia, Michoacán, México, rmr@pumas.iingen.unam.mx

[4]Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Ciudad de México, México, rdm@pumas.iingen.unam.mx

[5]Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Ciudad de México, México, ecae@pumas.iingen.unam.mx

[6]Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Ciudad de México, México, josuerojas33@hotmail.com

[7]Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Morelia, Michoacán, México, asolbe@hotmail.com

Autora para correspondencia: Maritza Liliana Arganis-Juárez, MArganisJ@iingen.unam.mx

Resumen

En este estudio se obtuvieron políticas de operación del tipo curvas Z, usando dos métodos de optimización: el de gradiente reducido

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

generalizado (GRG) no lineal y un algoritmo genético (AG) simple, y se aplicaron a un sistema de aprovechamiento hidráulico localizado en la cuenca del lago de Cuitzeo, que juega un papel importante en el abastecimiento de agua a una parte de la población de la ciudad de Morelia y en el riego de varios módulos del Distrito de Riego (DR) 020, conocido como Morelia-Queréndaro. Con cada política obtenida se simuló el funcionamiento del sistema, usando el registro histórico de volúmenes de ingreso al sistema, para poder comparar con lo reportado por la Comisión Nacional del Agua (Conagua), y se eligieron aquellas que mantuvieron el balance entre cumplimiento de demandas y menor presencia de derrames o de déficits. Finalmente, con el fin de revisar el comportamiento del sistema en el largo plazo al utilizarse las políticas seleccionadas, se simularon series de volúmenes de ingreso mensual sintéticos con 100 años de registro, generados con el método de Svanidze. La comparación de los resultados de déficit y derrames a nivel mensual y anual de las simulaciones realizadas con la curva Z histórica, AG y GRG, indicaron que el AG tuvo un comportamiento aceptable tanto en el periodo histórico como a largo plazo, pues aunque los volúmenes derramados aumentaron, la magnitud en la que lo hicieron es menor a la magnitud en la que se redujo el déficit, y como la presa de Cointzio ha sido utilizada para suministro de agua a la planta potabilizadora de Vista Bella y para riego de 4 de los 5 módulos del Distrito de Riego 020 se eligió la regla de operación que controló mejor el evento de déficit. El algoritmo GRG reportó múltiples ventajas, entre ellas su facilidad de uso y la rapidez con la que encuentra resultados, siempre que no se indiquen demasiadas

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

iteraciones; sin embargo, una desventaja del método es que no siempre converge a un óptimo global, ya que para distintos valores iniciales de la política Z el algoritmo dio diferentes valores óptimos. El AG, por su parte, converge a óptimos globales para cada simulación debido a que cada vez que se aplica el proceso se genera aleatoriamente una población y el resultado fue el mismo para unas condiciones de coeficientes de penalización dadas. Una limitante del método de los AG es el tiempo de cómputo empleado para la obtención de resultados.

Palabras clave: políticas de operación, funcionamiento de vaso, algoritmo genético, gradiente reducido generalizado, riego y agua potable, presa Cointzio.

Abstract

In this study, operating policies of the Z curves type were obtained, using two optimization methods: the Generalized Reduced Gradient (GRG) Nonlinear and a simple Genetic Algorithm (GA), and they were applied to a reservoir located in the Cuitzeo lake basin, which plays an important role in supplying water to a part of the population of the city of Morelia and in the irrigation of several modules of the Irrigation District (DR) 020, known as Morelia-Queréndaro. With each policy obtained, the operation of the system was simulated, using the historical record of inflow volumes into the system, to compare with the reported by the National Water Commission (Conagua) and those that maintained the balance between compliance with demands and less presence of spills or deficits. Finally,

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

to review the behavior of the system in the long term when using the selected policies, ~~a~~ series of synthetic monthly inflow volumes with 100 years of record were simulated, generated with the Svanidze method. The comparison of the deficit and spillage results at the monthly and annual level of the simulations carried out with the historical Z curve, GA and GRG, indicated that the GA had an acceptable behavior both in the historical period and in the long term, since, although the volumes spilled increased, the magnitude in which they did so is less than the magnitude in which the deficit was reduced and as the Cointzio dam has been used to supply water to the Vista Bella water treatment plant and for irrigation of 4 of the 5 modules of the irrigation district 020, the operating rule that best controlled the deficit event was chosen.

Keywords: Operation rules, reservoir operation, genetic algorithm, generalized reduced gradient, irrigation and drinking water, Cointzio dam.

Recibido: 08/01/2020

Aceptado: 12/04/2021

Introducción

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Dentro de los usos que los sistemas hidráulicos tienen destaca la importancia de dos: el abastecimiento público y el agrícola (Conagua, 2007). El primero porque su porcentaje de cobertura es un indicador de bienestar social, y el segundo por ser el principal destino del agua que se extrae tanto de fuentes superficiales como subterráneas (Semarnat, 2002). El Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) reportó que en 2015 el porcentaje de población en México con acceso a agua potable era del 97.8 en zona urbana y del 87.0 en rural (Conagua, 2020). Los datos reportados por diversas instituciones federales muestran que el uso consuntivo predominante en México es el agrícola; en 2000, el 78 % del agua extraída se utilizó para el riego de 6.3 millones de hectáreas (Semarnat, 2002).

Sin embargo, al ser el agua un recurso cada vez más escaso en el planeta, la operación y manejo de los sistemas hidráulicos debe contar no sólo con los estudios previos de factibilidad técnica e impacto ambiental, sino también con políticas de operación que permitan el manejo eficiente del recurso agua, manteniendo el balance entre cumplir con las demandas que tenga y evitar derrames que puedan afectar poblaciones aguas abajo. Asimismo, esas reglas de operación deben ser actualizadas ante los cambios que la actividad antropogénica induce en la naturaleza y, por ende, en las variables climatológicas que se usaron para el diseño y aprovechamiento del sistema.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

El objetivo general del presente estudio es obtener políticas de operación usando dos métodos de optimización: el de gradiente reducido generalizado (GRG) (López & Sánchez, 1998) no lineal y un algoritmo genético (AG) simple (Holland, 1975; Goldberg, 1989), y aplicarlas a un sistema de aprovechamiento hidráulico localizado en la cuenca del lago de Cuitzeo, que juega un papel importante en el abastecimiento de agua a una parte de la población de la ciudad de Morelia y en el riego de varios módulos del Distrito de Riego (DR) 020, conocido como Morelia-Queréndaro. Con cada política obtenida se simula el funcionamiento del sistema, usando el registro histórico de volúmenes de ingreso al sistema, para poder comparar con lo reportado por la Comisión Nacional del Agua (Conagua), que es el organismo federal encargado del manejo y operación de los sistemas hidráulicos en México, y elegir aquellas que cumplan con mantener el balance entre cumplimiento de demandas y menor presencia de eventos de derrame. Finalmente, con el fin de revisar el comportamiento del sistema en el largo plazo al utilizarse las políticas seleccionadas, se simularon series de volúmenes de ingreso mensual sintéticos con cien años de registro generados con el método de Svanidze (Svanidze, 1980).

El trabajo está organizado en seis apartados más: en el segundo se hace una revisión de trabajos tanto nacionales como internacionales que aplican técnicas de optimización para obtener reglas de operación y aplicarlas a casos particulares; el tercero describe el sitio de estudio; el cuarto toca las metodologías empleadas en este trabajo; el quinto detalla las consideraciones hechas para la aplicación de las metodologías al caso

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

particular del sistema hidráulico elegido, y en el sexto y último se dan las conclusiones del estudio.

Estado del arte

En las últimas décadas se han realizado estudios en los que se aplican diferentes algoritmos en busca de políticas de operación óptimas; tal es el caso de Cancelliere, Ancarani y Rossi (2002), que usaron tanto programación dinámica como redes neuronales para obtener políticas de operación con propósito de riego, que simuló con éxito en periodos de escurrimientos normales y de sequía en el embalse Pozzillo alojado en el río Salso de Sicilia; Moghaddasi, Araghinejad y Morid (2010) utilizaron métodos de multiplicadores de Lagrange para optimizar variables de decisión aplicados a modelos de operación de largo plazo en el embalse de Zayandeh-rud de Irán; Wua y Chen (2014) utilizaron un método de optimización del tipo NelderMed combinado con un algoritmo evolutivo de búsqueda aleatoria acoplado con simulaciones hidrológicas para obtener políticas de operación flexibles conciliando los objetivos de generación de electricidad, riego y agua potable en el embalse Xinfengjiang de China; Kumar *et al*. (2013) emplearon herramientas de tipo lógica difusa y las

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

aplicaron en el sistema hidráulico del río Sutlej, en India. Kang y Woo (2014) utilizaron un modelo determinista de pronóstico de flujos y demandas de agua, y emplearon el método de optimización global llamado método de evolución y mezcla de complejos (*Shuffled Complex Evolution* SCE-UA) de la Universidad de Arizona (Gotay & Jorge, 2003), guiado por una función objetivo que busca la extracción óptima del agua en diferentes periodos para obtener nuevas reglas de operación que permitan dar soluciones más razonables a las históricamente usadas; además, desarrollaron un modelo de predicción de demanda de agua cuya función es maximizar la energía generada por la hidroeléctrica y alcanzar un nivel objetivo en el embalse para cada periodo de operación. Los modelos que se obtuvieron se aplicaron al embalse de Balam y al de Seomjingang. Ndiritu *et al*. (2016) evaluaron las reglas de operación de la presa Hluhluwe, Sudáfrica, encontrando decisiones basadas en la experiencia y mejorándolas considerando optimización no lineal y simulación de series sintéticas, para obtener curvas mensuales de asignación de agua.

Minjares, Salmón, Orozco y Cruz (2008) utilizaron algoritmos genéticos sobre un modelo anual hidrológico-agronómico-económico para optimizar el manejo del sistema de embalses de río Yaqui, seleccionando un patrón de cultivos óptimos de acuerdo con su máximo rendimiento económico y con las extracciones óptimas mensuales de agua para riego; Malekmohammadi, Kerachian y Zahraieb (2009) aplicaron un algoritmo genético para optimizar el sistema contra inundaciones para el río Dez de Irán, luego, junto con la ley de demandas por riego, alimentaron un

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

segundo algoritmo genético de cromosoma variable que finalmente ingresaría los datos a una red bayesiana para obtener una extracción mensual óptima mejorada. Chang, Chan y Shin (2010) utilizan algoritmos genéticos restringidos por los requerimientos de gasto ecológico sobre una función objetivo que integra un conjunto de penalización para diferentes restricciones con el fin de optimizar las extracciones de la presa Shih-Men, Taiwán. Falllah-Mehdipour, Bozorg y Mariño (2013) aplicaron algoritmos genéticos, algoritmos de optimización de enjambre de partículas y algoritmos de optimización de salto de rana para determinar la planificación óptima multipropósito de salidas para una serie de tiempo específica de forma lineal y no lineal. Acuña (2014) hizo una revisión histórica de los ingresos a las presas del Sistema Cutzamala en México, con el objetivo de generar una curva tipo Z definida por los almacenamientos mínimos/extracciones mínimas y los almacenamientos máximos/extracciones máximas; posteriormente, utilizando un algoritmo genético que ajusta los cuatro parámetros de la curva con el objetivo de optimizar las extracciones, disminuyendo los derrames y evitando los déficits que se lleguen a presentar.

Sitio de estudio

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

La presa de Cointzio (Figura 1) se ubica entre los límites de los estados de Michoacán de Ocampo y Guanajuato, México (Cram, Galicia, & Israde, 2010). Pertenece a la cuenca de Cuitzeo en la región hidrológica RH-020 denominada "Lerma-Santiago". La cuenca tiene una extensión de 3 657 km^2 (Conagua & CEAC, 2009), de los cuales 643 km^2 (17 %) corresponden a la subcuenca de la presa Cointzio (Susperregui, Gratiot, Esteves, Duwig, & Prat, 2007).

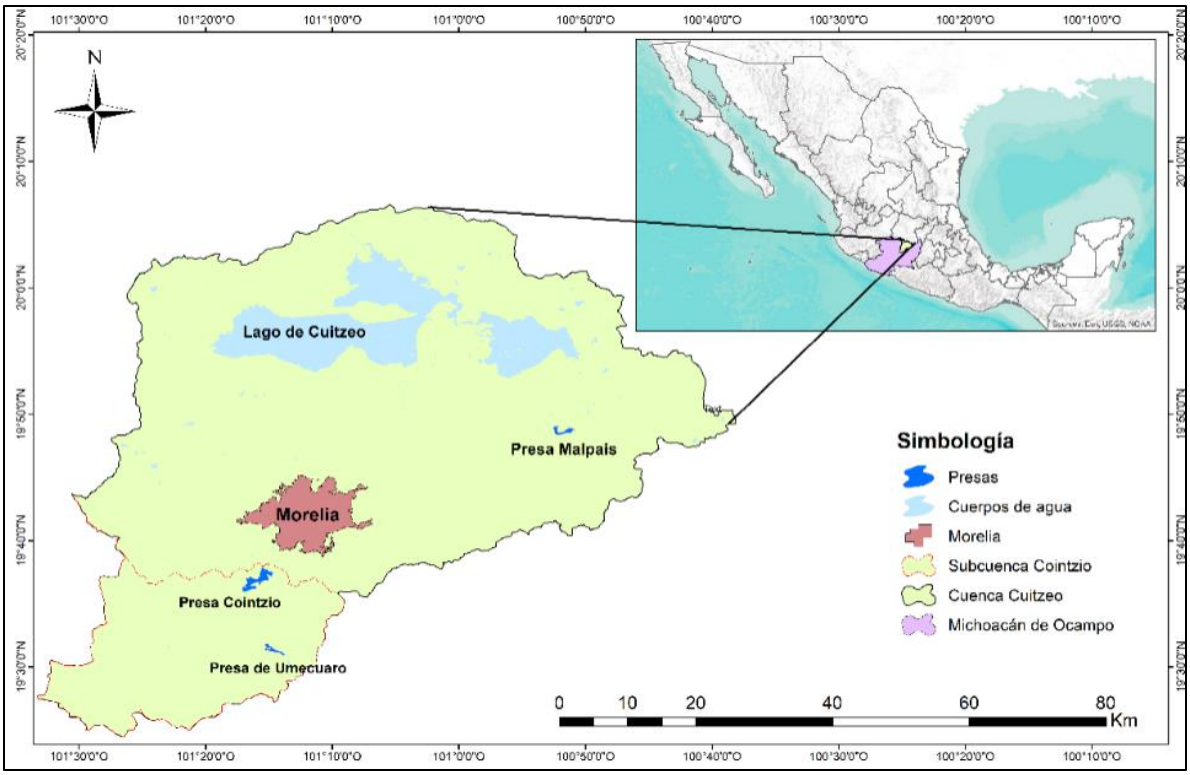

Figura 1. Localización de la cuenca de lago de Cuitzeo (edición propia).

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

El aprovechamiento de las aguas de la presa data de fines de los años treinta del siglo pasado. El embalse se construyó para aprovechar las aguas de los ríos Tirio y Tiripetío (García, 2011), con el fin de proporcionar agua al Distrito de Riego (DR) 020 Morelia-Queréndaro y para la generación de energía eléctrica (sólo hasta 1982). A partir de 1950, el embalse también suministra agua potable a la ciudad de Morelia, proporcionando un 23 % del total del volumen de agua requerido (OOAPAS, 2018).

La cortina de la presa Cointzio se ubica en las coordenadas geográficas: latitud 19.6139 y longitud: -101.166 de acuerdo con el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) del Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua (IMTA). La Tabla 1 resume las áreas y capacidades del embalse para diferentes elevaciones.

Tabla 1. Elevaciones-capacidades-áreas de la presa Cointzio (Conagua, 2019).

Nivel	Altura (msnm)	Volumen (hm^3)	Áreas (ha)
Corona	2 002.82	88.57	640.21
NAME	2 001.32	79.23	604.74
NAMO	1 999.47	68.51	551.28
Cresta vertedora	1 995.97	50.83	463.28

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

NAMINO	1 972.31	0.90	47.48

Materiales y métodos

El problema de obtener una política de operación óptima consiste en identificar el volumen de agua que debe extraerse para satisfacer todas las demandas y obtener el máximo beneficio durante la operación. (Alegría, 2010); la decisión de qué volumen extraer depende del almacenamiento inicial.

Al tratarse de una presa que aporta parte de los volúmenes extraídos para el riego del DR 020 es conveniente maximizar estos volúmenes para obtener un beneficio óptimo durante la operación del embalse; para lograrlo se utilizó la función objetivo dada por la Ecuación (1) que maximiza las extracciones por obra toma, al mismo tiempo que se penalizan los volúmenes presentados por eventos nos deseados de derrames o de déficit. La ecuación permite dar mayor importancia a los volúmenes derramados o a los volúmenes de déficit, según los coeficientes que los afecten:

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

$$FO2 = Max\left(Cr * Vol_{riego} - Cderr * Vol_{derramado} - Cdéf * Vol_{déficit} \right) \quad (1)$$

Donde:

$Vol_{derramado}$: son los volúmenes derramados por obra de excedencia (hm^3).

$Vol_{déficit}$: son los volúmenes que faltan por déficit (hm^3).

Vol_{riego}: son los volúmenes extraídos para riego por obra toma (hm^3).

Cr: es el coeficiente que afecta al volumen de riego (adimensional) e igual a 1 para todas las simulaciones-optimizaciones.

Cderr: es el coeficiente de penalización por derrame (adimensional).

Cdéf: es el coeficiente de penalización por déficit (adimensional).

Se definieron tres combinaciones de los valores de los coeficientes de penalización de derrame y déficit para con cada una obtener una política de operación: (1 000, 500), (1 000, 1 000) y (500, 1 000).

Una vez encontrada la regla de operación es necesario simular el funcionamiento del sistema para evaluar con mayor detalle el comportamiento principalmente de las variables derrame y déficit. Para ello, se usa la ecuación de continuidad que para un intervalo de tiempo Δt; se puede escribir como (2):

$$E - S = \Delta V \quad (2)$$

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Donde:

E: representa los volúmenes de agua que entran al vaso durante el intervalo considerado (hm^3).

S: representa los volúmenes que salen del vaso durante el mismo intervalo (hm^3).

ΔV: es la variación de volumen almacenado (hm^3).

La Figura 2 muestra el diagrama de flujo del funcionamiento de vaso a nivel anual. El volumen de almacenamiento inicial en el año $i = 0$ se iguala al volumen al NAMO (68.51 hm^3); para los años $i + 1$ posteriores, se ocupa el volumen final real calculado para el año anterior inmediato.

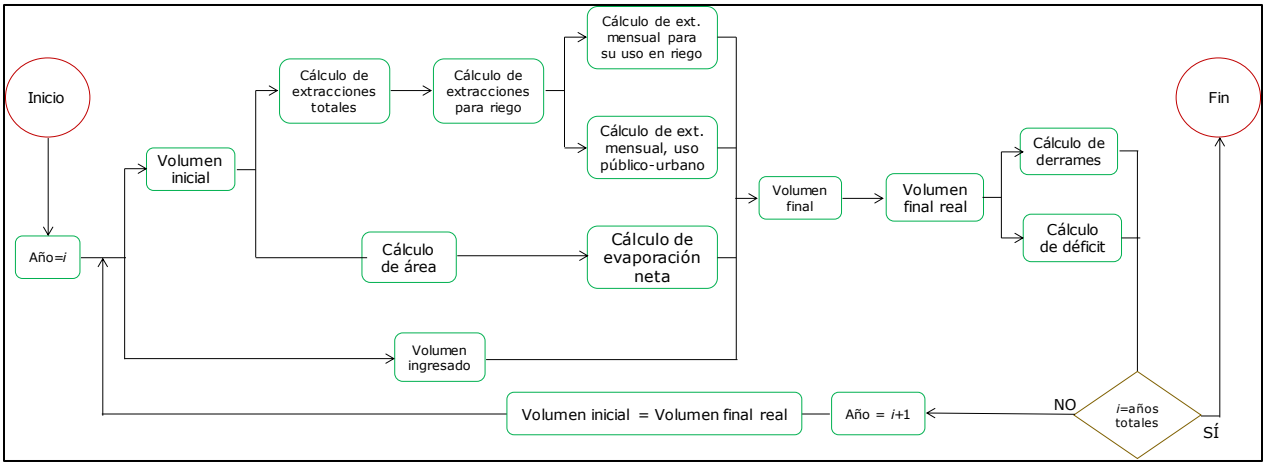

Figura 2. Diagrama de flujo del funcionamiento de vaso.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

En los volúmenes de ingreso al embalse se consideran los escurrimientos por cuenca propia deducidos del reporte de funcionamiento diario del embalse de la Conagua del periodo 1940-2016 (Figura 3); sin embargo, al deducir los volúmenes de escurrimiento despejando los valores con la ecuación de continuidad se pueden obtener volúmenes negativos como resultado de falta de información o por la existencia de errores humanos dentro del reporte de funcionamiento. Los volúmenes negativos son inferidos matemáticamente y no existen físicamente, por lo que los valores se corrigieron sustituyéndolos con datos obtenidos de la estación hidrométrica 12347 Santiago Undameo (Figura 4).

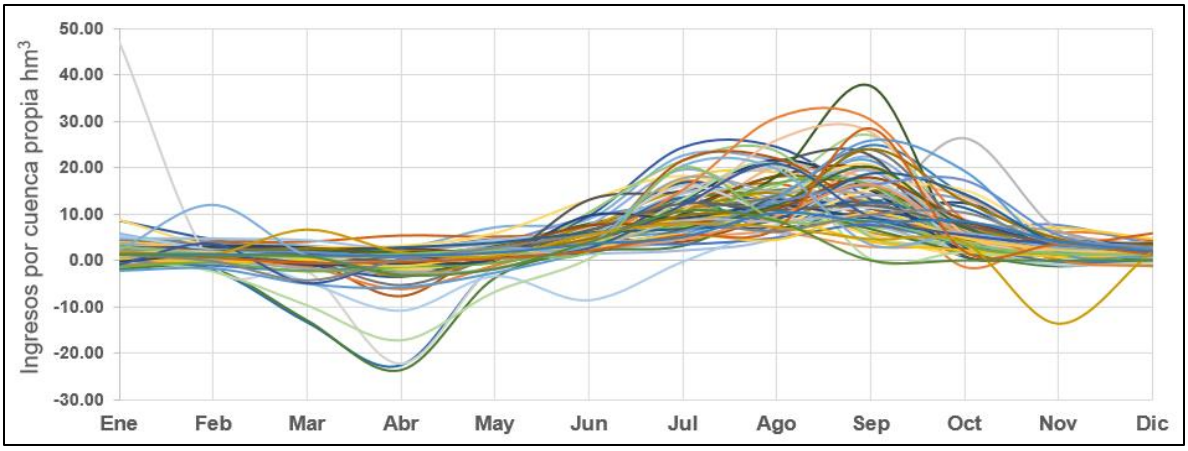

Figura 3. Ingresos mensuales por cuenca propia deducidos (series anuales de 1940 a 2016).

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

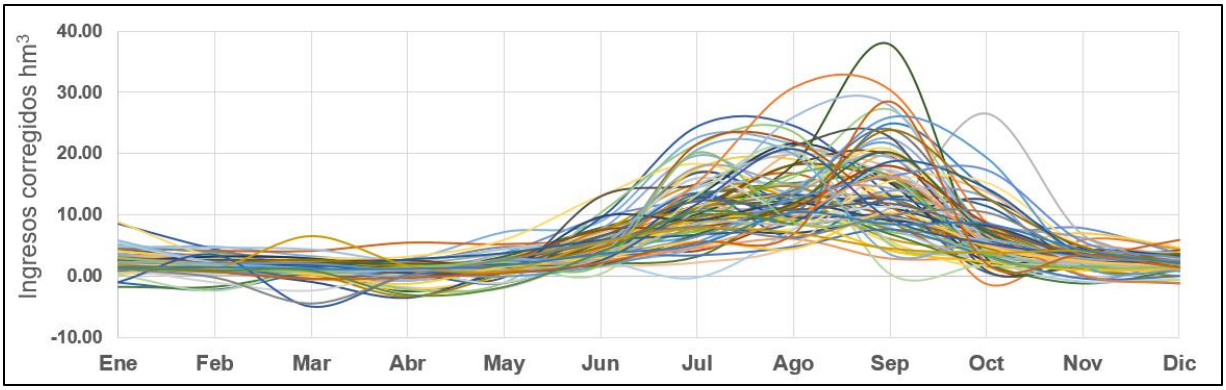

Figura 4. Ingresos mensuales por cuenca propia corregidos (series anuales de 1940 a 2016).

Para los volúmenes de salida se consideraron las extracciones de volumen de agua para riego y dotación de agua potable, así como una evaporación neta que considera los volúmenes de entrada por lluvia y de salidas por evaporación.

Métodos de optimización

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

a) El algoritmo de optimización no lineal gradiente reducido generalizado (GRG) en su versión GRG2 (López & Sánchez, 1998) es el método de solución predeterminado por Microsoft Excel© Solver©. El algoritmo fue desarrollado por la Universidad Leon Lasdon de Austin (Texas) y la Universidad Allan Waren (Cleveland) de EUA (González-Gómez, 2015); sus fundamentos se describen en Lasdon, Waren, Jain y Ratner (1978), y Lasdon y Waren (1978).

El algoritmo GRG es un proceso de resolución de igualdades o desigualdades sujetas a un conjunto de restricciones sobre un conjunto de variables reales desconocidas, con una función objetivo a maximizar o minimizar, siempre que alguna de las restricciones o las funciones objetivo no sea lineal. El método busca de forma sistemática entre todos los posibles valores una solución óptima, aunque el algoritmo puede converger a un óptimo local o global. La Figura 5 muestra el algoritmo básico que sigue Solver© (Caballero, 2011).

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

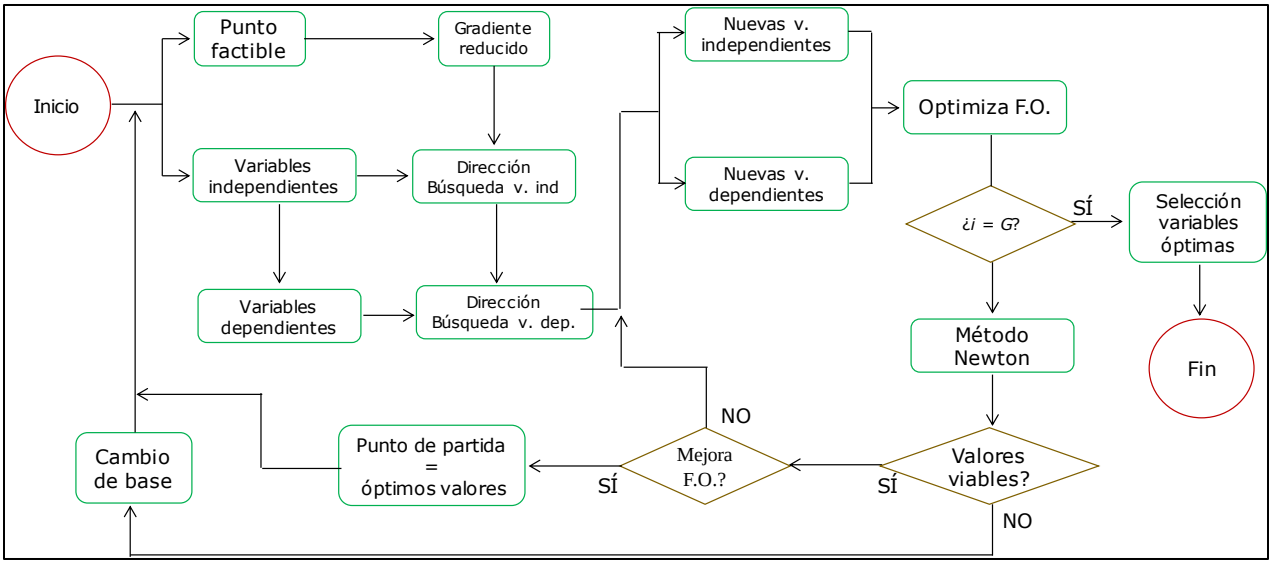

Figura 5. Algoritmo GRG (Caballero, 2011).

El algoritmo puede describirse como un movimiento o salto hacia una dirección de la región factible, de tal forma que el valor de la función objetivo mejore; el proceso continúa hasta que no exista una región factible para mejorar la función objetivo o si el potencial para tal mejora es arbitrariamente pequeño.

El uso del algoritmo de optimización GRG se hizo a través de una hoja de cálculo de Microsoft Excel©, que contenía programado el funcionamiento de vaso; el algoritmo GRG está sujeto a restricciones propias del funcionamiento del embalse, mientras que las celdas de decisión modificaban la simulación arrojando nuevos valores que se evaluaban en la función objetivo; con ello se decidía el próximo movimiento o salto que debería realizarse dentro de la región factible.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

b) Los algoritmos genéticos (AG) se basan en el principio de supervivencia del más apto, de la teoría de la selección natural de Darwin, por lo que forman parte de la computación bioinspirada, y se describen a detalle en Goldberg (1989) y Michalewicz (1996). El avance de la tecnología y el aumento de la velocidad en las computadoras personales ha vuelto a los AG una herramienta muy socorrida, aunque su aplicación en el caso de la hidrología y la hidráulica se hizo más notable a partir de la primera década del presente siglo, por citar sólo algunos ejemplos: Rincón (2006); Guzmán (2009); Fuentes, Palma y Rodríguez (2011); Acuña (2014); Fuentes y Palma (2014); Arganis, Preciado y Rodríguez (2015); Pereyra, Pandolfi y Villagra (2016).

En el caso de los AG, se acopló un programa hecho en Fortran© que simula el funcionamiento histórico del vaso. El algoritmo usado empieza con la generación aleatoria de una población inicial (cromosomas) de *n* individuos; cada individuo está formado por las coordenadas que define la curva Z (genes); con ellos se construyen archivos de entrada para el programa que simula el funcionamiento del vaso; otros archivos de entrada están definidos previamente. La simulación se realiza para cada individuo y los resultados se guardan en archivos de salida, cuyos valores se evalúan mediante la función objetivo. Mientras el número de generaciones fijada no se cumpla, el algoritmo selecciona aleatoriamente los mejores individuos, a los que se les aplican los operadores de cruza (método de la ruleta) y mutación en los genes para formar una nueva generación de individuos; los cambios de cruce y mutación pueden darse

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

a nivel binario o en la representación real, sumando la media, desviación estándar de los valores o bien aplicando algún otro método (Goldberg, 1989). La nueva población ingresa al algoritmo y el proceso se repite hasta cumplir con las generaciones fijadas; en ese momento se selecciona el mejor individuo que optimice la función objetivo y con él se construyen los archivos de solución: coordenadas de la curva Z y porcentajes mensuales optimizados, para hacer una nueva simulación con dicha política óptima. La Figura 6 muestra la secuencia que se siguió para llegar a la solución óptima.

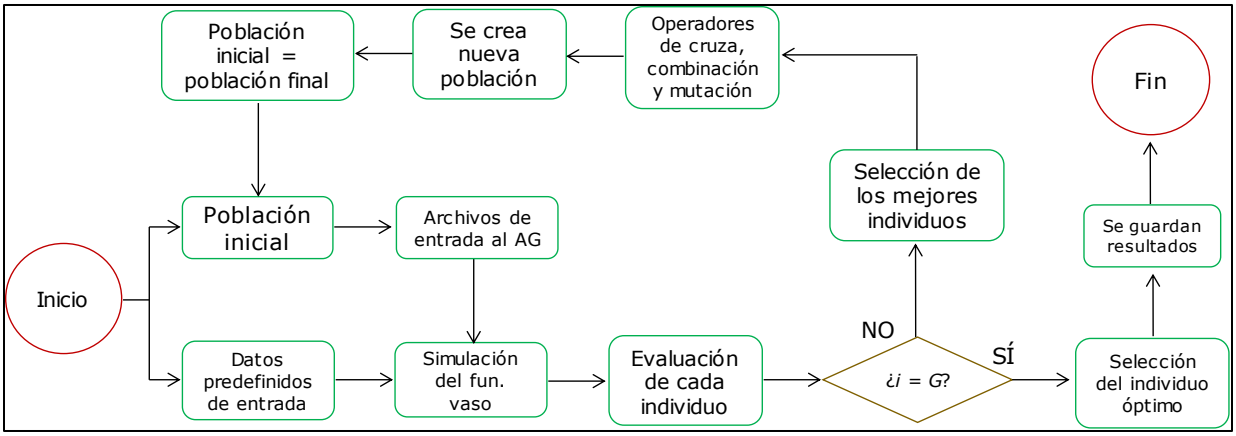

Figura 6. Algoritmo AG acoplado con la simulación del vaso.

Resultados

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Para poder aplicar los dos métodos de optimización es necesario calcular lo siguiente, de manera que se pueda simular el funcionamiento de vaso del embalse:

a) La evaporación neta promedio mensual del espejo de agua. Se calculó como la suma de las pérdidas por evaporación y las ganancias por lluvias mensuales; las láminas de evaporación neta se obtuvieron a partir del funcionamiento histórico del embalse (Conagua, 2019) (Figura 7).

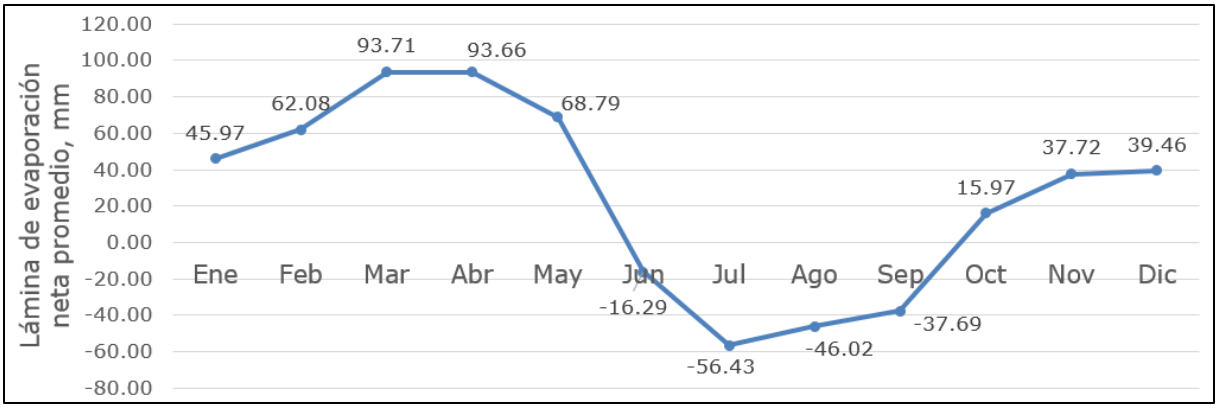

Figura 7. Lámina de evaporación neta promedio (periodo 1940-2016).

b) La demanda promedio histórica para riego. La temporada de riego en el DR 020 empieza en octubre del año *i* y finaliza en junio del año *i* + 1;

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

en los meses de julio, agosto y septiembre no se realizan extracciones de la presa, pues se usan para almacenar agua y preparar el nuevo año agrícola, aprovechando la temporada de lluvias abundantes. La Figura 8 muestra la asignación porcentual promedio histórica del volumen destinado a riego.

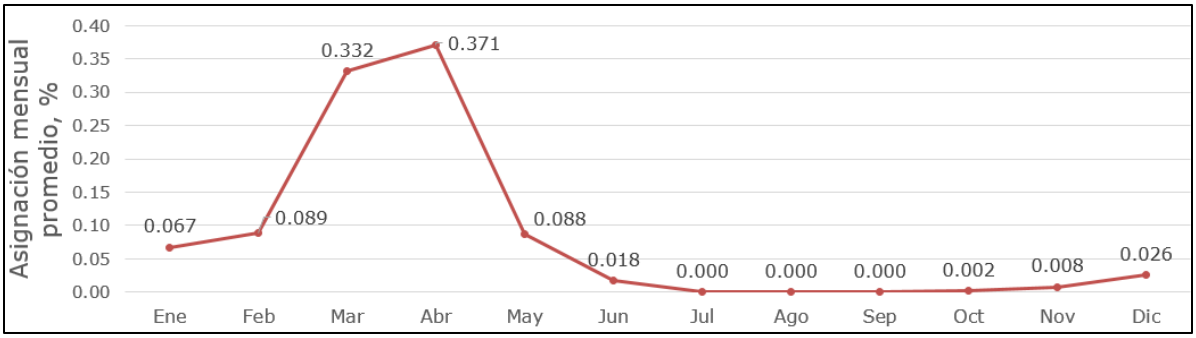

Figura 8. Distribución porcentual histórica del volumen asignado a riego. Periodo 1998-2018 (Conagua, 2019).

c) El volumen de agua del embalse que se extrae en forma ininterrumpida para suministro a la planta potabilizadora. La distribución de agua potable depende del Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (OOAPAS) de Morelia. La Figura 9 muestra una distribución casi homogénea en las extracciones con excepción de febrero, por lo que se puede considerar que el volumen promedio mensual es invariable e igual al promedio de los valores (1 734.27 miles de m^3/mensual, igual a 20 811.2 miles de m^3/anuales).

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

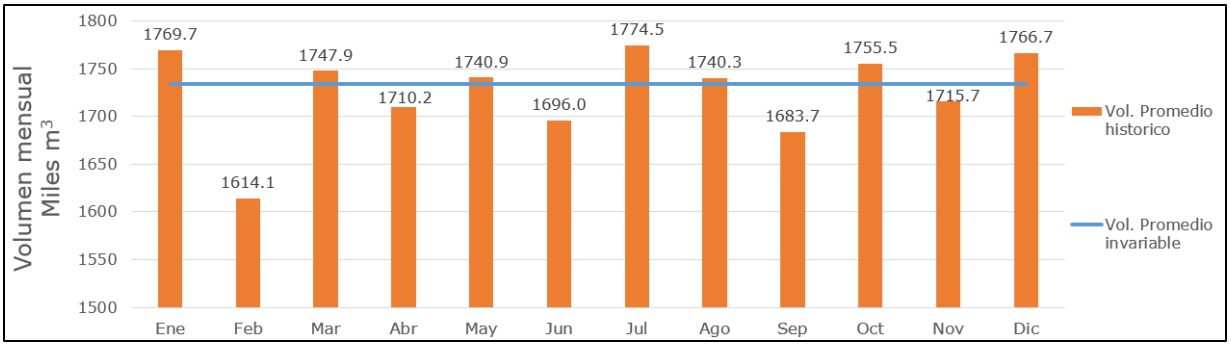

Figura 9. Volumen mensual promedio histórico destinado a dotación de agua potable. Periodo 1998-2018 (Conagua, 2019).

Debido a que inicialmente no se tuvieron datos confiables de la curva elevaciones capacidades por parte de la dependencia federal, se generó una curva Z (Figura 10), con los últimos cinco ciclos de riego (Tabla 2); para determinar los volúmenes totales de extracción se utilizó la suma de los volúmenes extraídos y aprobados para su uso agrícola más el volumen promedio anual de 20 811.2 miles de m^3 para la dotación de agua potable. El volumen de almacenamiento inicial máximo se igualó a la capacidad del embalse al NAMO (ver Tabla 1), mientras que para el almacenamiento inicial mínimo se utilizó el valor histórico del almacenamiento al primero de octubre de 2016 igual a 54.585 hm^3, que corresponden al volumen mínimo histórico durante el periodo de 2014-2015 a 2018-2019. Con esta curva Z histórica se hizo una simulación para tomarla como referencia para las comparaciones mensuales y anuales de los resultados.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

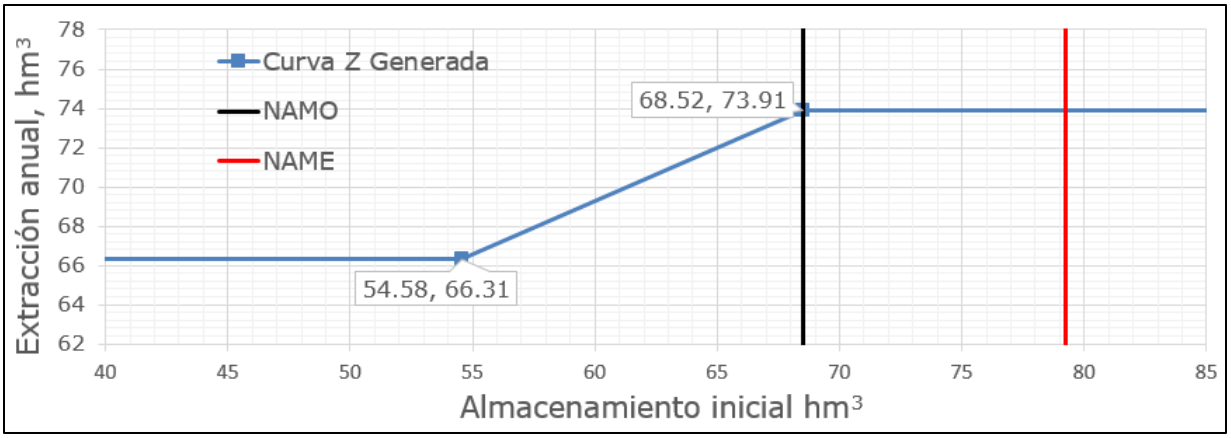

Figura 10. Curva Z, periodo de 2014-2015 a 2018-2019 (Conagua, 2019).

Tabla 2. Volúmenes aprobados para riego, periodo de 2014-2015 a 2018-2019 (Conagua, 2019).

Ciclo	Vol. riego	Vol. agua potable	Vol. total
	hm³	**hm³**	**hm³**
2014-2015	51.30	20.811	72.111
2015-2016	52.80	20.811	73.611
2016-2017	45.50	20.811	66.311
2017-2018	53.10	20.811	73.911
2018-2019	52.94	20.811	73.751

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Con el fin de revisar el comportamiento del sistema en el largo plazo de utilizarse las políticas seleccionadas, se simularon series de volúmenes de ingreso mensual sintéticos con cien años de registro con el método de Svanidze (Svanidze, 1980), que permite generar series periódicas, con la ventaja de que no se requiere que los datos tengan una distribución normal (Domínguez, Fuentes, & Arganis, 2001; Arganis, Domínguez, Cisneros, & Fuentes, 2008). Este método consta de un doble procedimiento aleatorio. Primero se realiza un análisis estadístico para determinar la función de distribución de probabilidades de mejor ajuste a la serie anual, donde cada valor es igual a la suma de los volúmenes mensuales de entrada por cuenca propia que ocurren durante el año hidrológico, esto es, de octubre del año *i* a septiembre del año *i* + 1. El segundo procedimiento consiste en generar fracciones sintéticas del periodo considerado (mensuales), que son porcentajes mensuales respecto a los totales anuales de años aleatorios; finalmente, se crean datos sintéticos mensuales multiplicando las fracciones sintéticas de los años aleatorios por los volúmenes anuales generados. La Figura 11 muestra que los volúmenes totales anuales del registro histórico tuvieron el comportamiento de una función Gumbel con los parámetros: $\alpha = 0.081$ y $\beta = 56.6254$; a partir de esto se generaron diferentes series de volúmenes anuales sintéticos.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

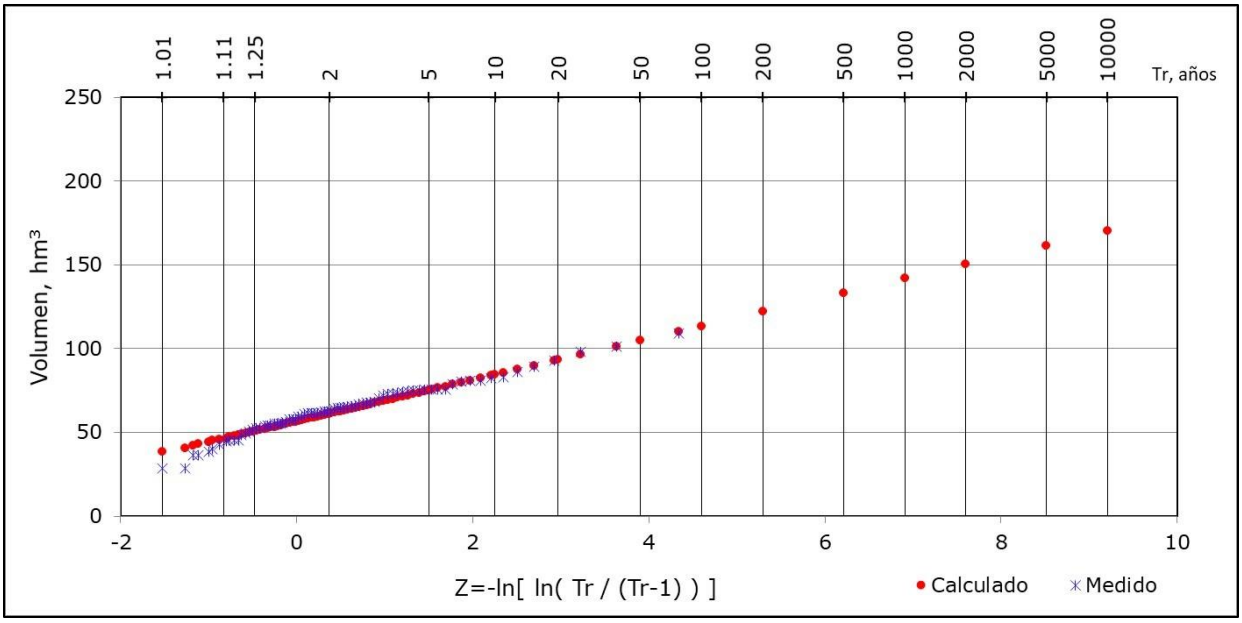

Figura 11. Volumen total anual registro histórico y curva de ajuste Gumbel.

La Tabla 3 muestra los valores estadísticos promedio de las 10 series sintéticas generadas con cien años de registro cada una. La Tabla 4 muestra los valores estadísticos para los datos históricos.

Tabla 3. Estadísticos promedio de las 10 series sintéticas generadas.

Sintéticos	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.
Media	6.654	2.930	2.179	2.642	1.752	1.026	0.525	2.002	5.168	11.063	13.328	14.426
Desv. Est.	4.324	1.969	1.398	1.607	1.390	1.625	1.484	1.472	2.490	5.298	5.456	7.509
Coef. Asim.	0.924	1.041	0.121	0.432	-0.812	-0.716	-1.214	0.027	0.968	1.024	1.655	1.107

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Coef. var.	0.651	0.672	0.644	0.611	0.798	1.611	3.048	0.742	0.481	0.479	0.407	0.520

Tabla 4. Estadísticos del registro histórico.

Históricos	**Oct.**	**Nov.**	**Dic.**	**Ene.**	**Feb.**	**Mar.**	**Abr.**	**May.**	**Jun.**	**Jul.**	**Ago.**	**Sep.**
Media	6.621	2.876	2.169	2.628	1.789	1.067	0.627	1.950	5.114	11.139	13.442	14.324
Desv. Est.	4.585	1.681	1.283	1.680	1.323	1.600	1.403	1.516	2.446	5.155	5.431	7.152
Coef. Asim.	1.687	0.256	-0.226	0.935	-0.536	-0.584	-0.249	0.553	1.035	0.432	0.772	0.678
Coef. var.	0.693	0.585	0.591	0.639	0.739	1.499	2.237	0.778	0.478	0.463	0.404	0.499

En la Figura 12, Figura 13, Figura 14 y Figura 15 se encuentran, respectivamente, la comparación gráfica de los estadísticos: media, desviación estándar coeficiente de asimetría y coeficiente de variación promedio de las 10 series sintéticas y del registro histórico.

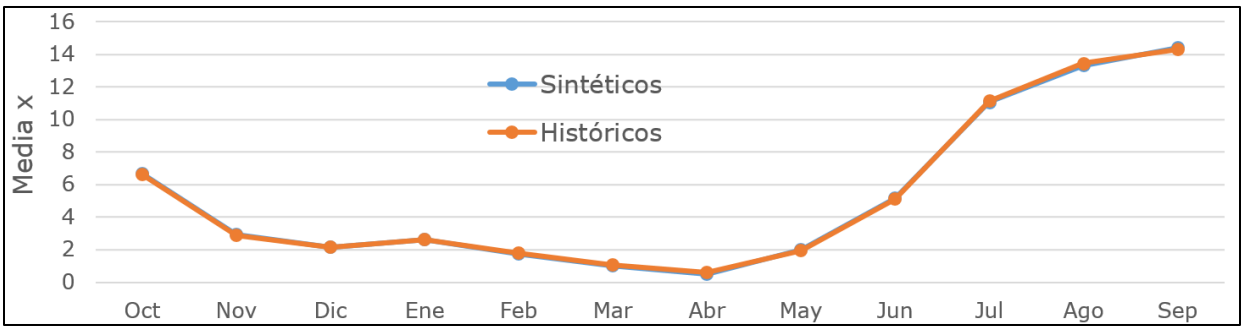

Figura 12. Media de los valores históricos y sintéticos.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

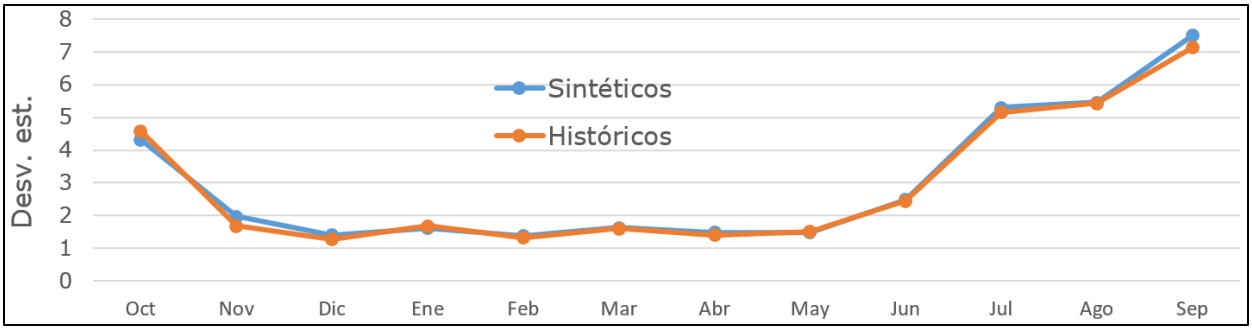

Figura 13. Desviación estándar de los valores históricos y sintéticos.

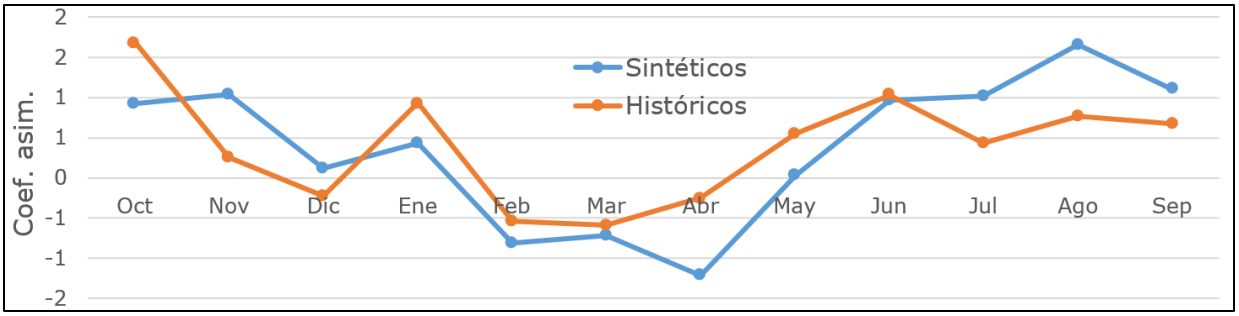

Figura 14. Coeficiente de asimetría de valores históricos y sintéticos.

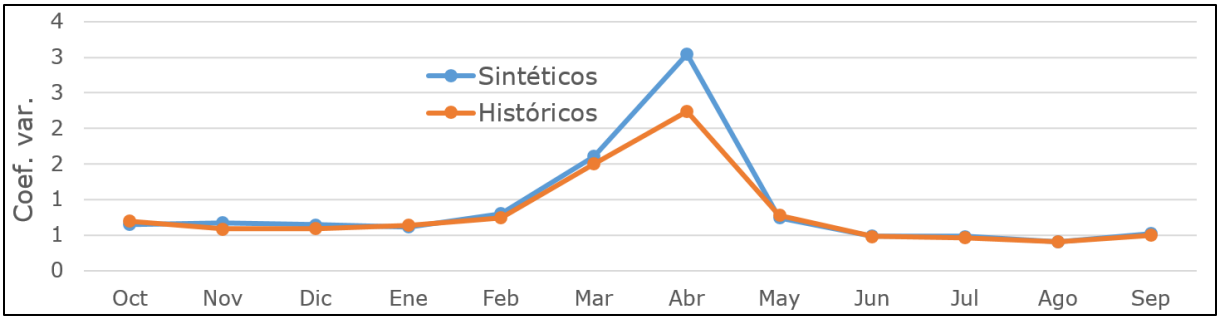

Figura 15. Coeficiente de variación promedio de los valores históricos y sintéticos.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

La Tabla 5 muestra los volúmenes extraídos de agua potable para riego y totales, así como los derrames y déficits que se obtuvieron al utilizar ambos métodos de optimización (algoritmo AG y GRG no lineal) para optimizar la función objetivo, fijando como variables de búsqueda a las coordenadas de los puntos "a" (almacenamiento inicial mínimo, extracción mínima) y "b" (almacenamiento inicial máximo, extracción máxima) de la curva Z.

Tabla 5. Resultado de las simulaciones. Periodo simulado, 1940-2016.

	Ext. riego	**Ext. potable**	**Derrame**	**Déficit**	**cder**	**Cdéf**
Simulación	**(hm³)**					
Z	3 491.8641	1 581.6512	124.60	396.36		
GRG-B1	3 183.53	1 581.65	77.71	50.78	1 000	500
GRG-B2	3 151.49	1 581.65	89.21	33.07	1 000	1 000
GRG-B3	3 090.43	1 581.65	120.20	8.58	500	1 000
AG-1	3 385.36	1 580.8	77.83	152.61	1 000	500
AG-2	3 354.92	1 580.8	90.58	134.93	1 000	1 000
AG-3	3 310.31	1 580.8	116.41	116.06	500	1 000

En la simulación denominada Z se usó la curva Z obtenida con los datos históricos (Figura 10). Las simulaciones GRG-B y AG para las tres combinaciones de penalización utilizaron la función objetivo de la

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Ecuación (1), teniendo como punto de partida a la curva Z (Figura 10). El periodo de simulación fue de octubre de 1940 a septiembre del 2016.

En la Figura 16 y Figura 17 se muestra la comparación entre los volúmenes derramados y de déficit totales que se obtuvieron en todas las simulaciones; la serie Z corresponde a la simulación con la curva Z que se consideró como histórica.

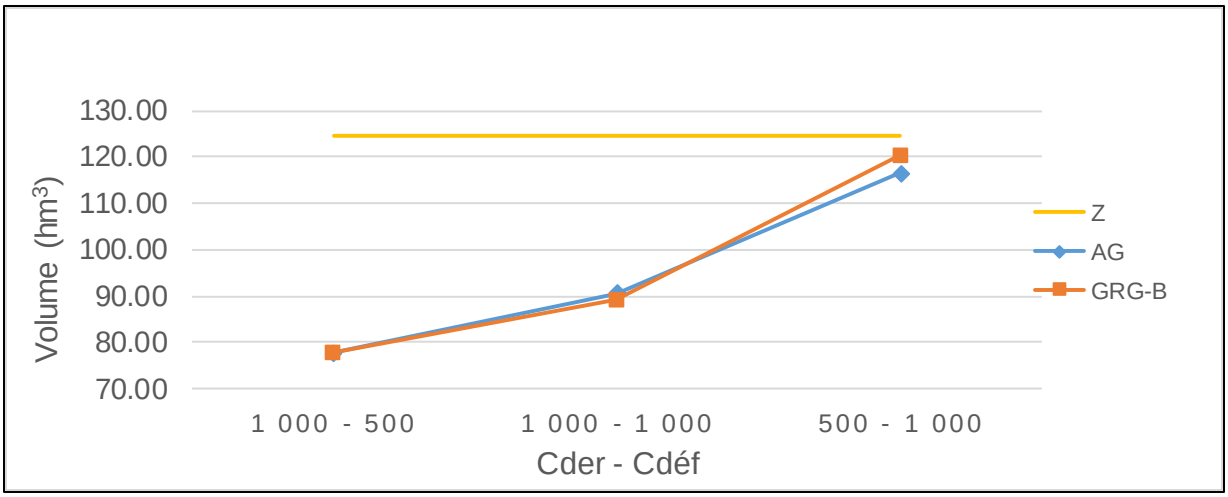

Figura 16. Comparación Derrames totales. Periodo simulado: 1940-2016.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

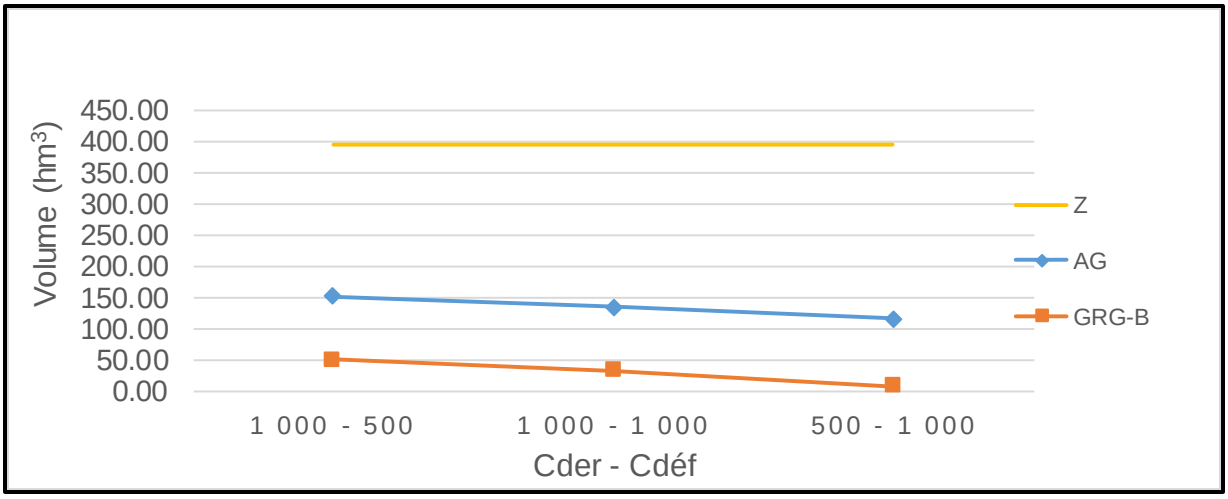

Figura 17. Déficits totales. Periodo simulado: 1940-2016.

De las gráficas anteriores se puede observar que al comparar los derrames totales de los ensayos hechos con la curva Z histórica, GRG y AG, los resultados son muy similares entre GRG y AG, y ambas políticas son mejores en cuanto a déficit y derrames totales que los obtenidos con la curva Z histórica; sin embargo, al comparar los déficits, se tiene que en las simulaciones con GRG son de menor magnitud. También se contabilizaron los volúmenes derramados y de déficit; la Tabla 6 presenta el número de meses en los que ocurrieron estos eventos en cada simulación. Se puede observar nuevamente que el número de déficits ocurridos es menor en las simulaciones hechas con GRG. En cuanto a los derrames, se mantienen muy similares con ambos métodos de optimización. Por otro lado, los resultados de las simulaciones realizadas a partir de las reglas de operación, obtenidas con los dos métodos de optimización, comparadas con la operación histórica (Z en la Tabla 6)

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

muestran menos número de meses con derrames y sobre todo menos meses con déficits.

Tabla 6. Número de meses con derrame y déficit por simulación.

Simulación	Derrame	Déficit
Z	37	61
AG-1	25	40
AG-2	29	36
AG-3	33	31
GRG-B1	18	23
GRG-B2	25	16
GRG-B3	33	6

Para tener mayor detalle del comportamiento mensual de los derrames y déficit que se obtienen con la curva Z histórica (señalada como Z) y las optimizadas, se seleccionaron de la Tabla 6 las políticas GRG-B3 y AG-3 ,porque presentan los menores volúmenes totales de déficits y un menor número de esos eventos ocurridos mensualmente durante las simulaciones, y se hicieron la Figura 18 y Figura 19.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

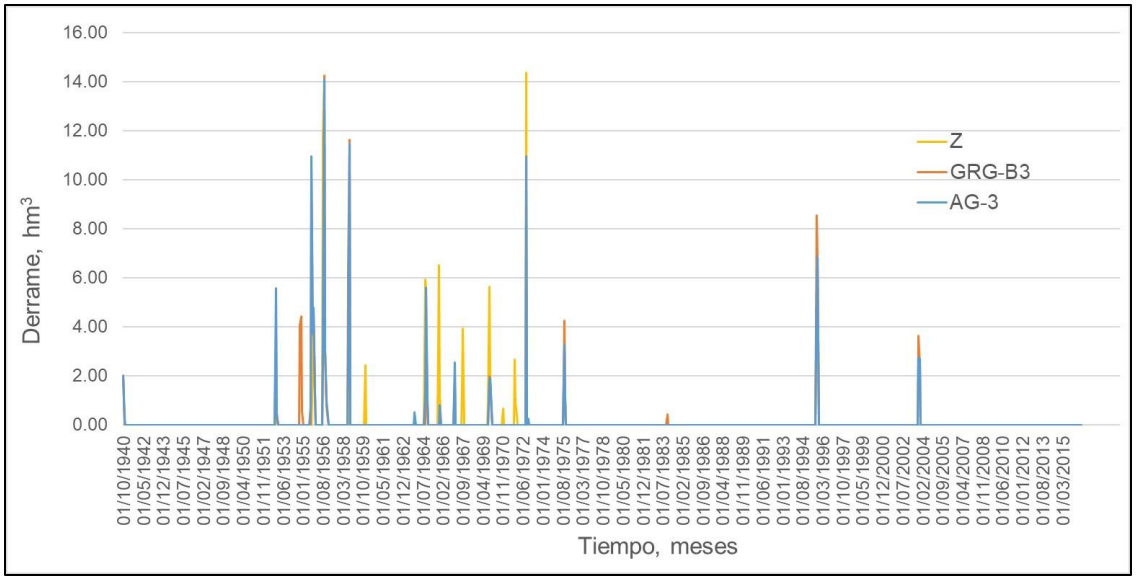

Figura 18. Derrames mensuales. Periodo simulado: 1940-2016.

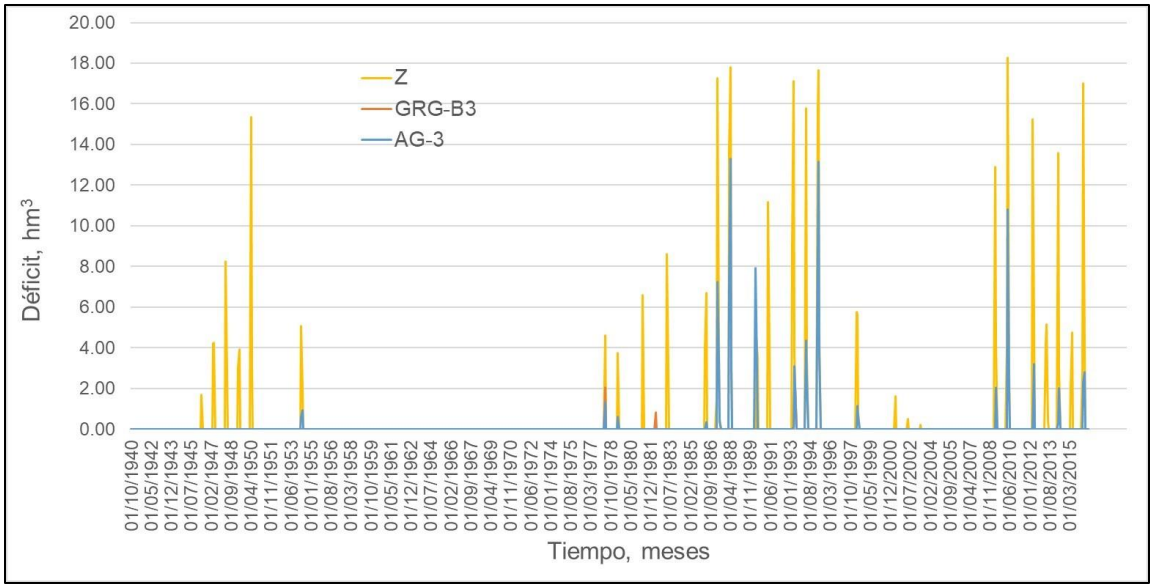

Figura 19. Déficits mensuales. Periodo simulado: 1940-2016.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Debido a que el método GRG puede incurrir en óptimos locales, y ante la poca diferencia en el número de veces que se puede presentar un derrame o un déficit entre las políticas GRG–B3 y AG-3, se decidió escoger como mejor política la llamada AG-3 para realizar la simulación de 10 series sintéticas de cien años cada una, considerando casi 20 años más que el registro histórico, y ahondar en su comportamiento al utilizarla en el largo plazo. La Tabla 7 muestra los valores promedio de los volúmenes extraídos para riego y agua potable, derramados y faltantes que se presentaron durante las simulaciones utilizando las 10 series sintéticas. En la Tabla 8 aparecen los volúmenes promedio anuales de las simulaciones con el registro histórico y con las series sintéticas, calculados como el cociente de los valores de la Tabla 7 entre los años simulados: 77 para el registro histórico y 100 para las series sintéticas. De la Tabla 7, se puede observar que de manera general los volúmenes de déficit se redujeron al utilizar los valores sintéticos, pero al mismo tiempo los volúmenes derramados aumentaron.

Tabla 7. Resumen de las simulaciones del funcionamiento de vaso usando el registro histórico y las series sintéticas.

	Ext. riego	**Ext. potable**	**Derrame**	**Déficit**
Simulación	**(hm^3)**			
Z histórico	3 585.08	1 631.94	124.60	493.45

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

AG-3 con r. histórico	3 289.47	1 602.46	116.41	116.05
AG-3 SS prom.	4 101.68	2 081.12	215.02	64.28

Tabla 8. Resumen de volúmenes promedios anuales de las simulaciones del funcionamiento de vaso usando el registro histórico y las series sintéticas, bajo diferentes políticas de operación.

	Ext. riego	**Ext. potable**	**Derrame**	**Déficit**
Simulación	**(hm^3)**			
Z histórico	45.38	20.65	1.57	6.24
AG-3 R. con r. histórico	42.72	20.81	1.51	1.51
AG-3 SS prom.	41.02	20.81	2.15	0.64

Conclusiones

El uso del algoritmo GRG para obtener políticas de operación óptimas con fines de riego y agua potable reportó múltiples ventajas. Las principales son su facilidad de utilizar y la rapidez con la que se encuentran resultados, siempre que no se indiquen demasiadas iteraciones; sin

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 13(2), DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-08

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

embargo, el algoritmo GRG no siempre converge a un óptimo global, por lo que sería recomendable usar métodos más robustos.

Por otro lado, las simulaciones hechas con el algoritmo AG convergen a óptimos globales para cada simulación debido a que el proceso no parte de un algún valor predefinido para la curva Z, sino que aleatoriamente se generan diferentes valores que se prueban y la respuesta dada por los AG para una propuesta de coeficientes de penalización fue invariante.

El método de Svanidze aplicado a los escurrimientos por cuenca propia logró reproducir el patrón de comportamiento de los estadísticos media, desviación estándar, coeficiente de variación en todos los meses, salvo en el mes de abril para el coeficiente de variación; y aunque el comportamiento del coeficiente de asimetría no se logró reproducir exactamente, los valores conservan la tendencia histórica.

Debido a que el embalse de la presa Cointzio suministra agua para riego del DR-020, se puede dar mayor importancia a reducir el déficit, siempre que los máximos derrames mensuales no tengan un potencial efecto devastador; en este trabajo se recomienda la política que se obtuvo en la simulación AG-3, que mantiene balanceados los volúmenes de derrames y de déficit, pero sin llegar a valores extremos y manteniendo los volúmenes de derrame y déficit lo más parecidos posible. En el largo plazo, al simular el comportamiento del sistema con esta política con las 10 series de 100 años obtenidas con el método de Svanidze, el volumen medio anual de derrame se incrementa ligeramente de 1.51 a 2.15 hm^3,

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

pero el déficit promedio anual se reduce de 1.51 a sólo 0.64 hm^3, de manera que se garantizan las entregas de agua para el distrito de riego 020 y el suministro de agua potable a la ciudad de Morelia.

Agradecimientos

Se agradece al Conacyt por el apoyo otorgado a la realización de este trabajo como parte del proyecto 2615: "Reglas de operación de embalses con usos riego-suministro de agua potable ante el cambio climático: caso de estudio presa Cointzio en Michoacán" de la convocatoria 2016 de Atención a Problemas Nacionales.

Referencias

Acuña, G. (2014). *Revisión y optimización de la operación histórica de las presas del sistema del río Cutzamala* (tesina de especialidad). Universidad Nacional Autónoma de México.

Alegría, A. (2010). *Política de operación optima del sistema de presas del río Grijalva. Efectos de la curva guía* (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México.

Arganis, M. L., Preciado, M., & Rodríguez, K. (2015). Daily rainfall interpolation models obtained by means of genetic programming. *Revista Facultad de Ingeniería* (Universidad de Antioquia), 75, 189-201 1. DOI: https://doi.org/10.17533/udea.redin.n75a18

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Arganis, M. L., Domínguez, R., Cisneros, H. L., & Fuentes, G. E. (2008). Génération d'échantillons synthétiques des volumes mensuels écoulés de deux barrages utilisant la Méthode de Svanidze modifiée. *Hydrologique Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 53(1). 130-141.

Caballero, J. A. (2011). Tema 10. Métodos numéricos para la optimización de problemas no lineales con restricciones. En: *Simulación y optimización de los procesos químicos*. Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante. Alicante, España: Universidad de Alicante.

Cancelliere, A., Ancarani, G., & Rossi, G. (2002). A neural networks approach for deriving irrigation reservoir operating rules. *Water Resources Management*, 16, 71-88.

Chang, L., Chan, F. J., & Shin, Y. D. (2010). Constrained genetic algorithms for optimizing multi-use reservoir operation. *Journal of Hydrology*, 390, 66-74.

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2020). *Acciones y programas. Sistema Nacional de Información del Agua. Infraestructura Hidráulica. Capítulo 4*. Recuperado de https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/infraestructura-hidroagricola

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2019). *Información del distrito de riego 020 y de la presa Cointzio. Morelia (Michoacán).* s.n. Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua.

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2007). *Usos del agua. Capítulo 3*. Recuperado de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/SINA/Capitulo_3.pdf

Conagua & CEAC, Comisión Nacional del Agua & Comisión Estatal de Aguas y Gestión de Cuencas(2009). *Plan de gestión integral de los recursos naturales de la cuenca del lago de Cuitzeo*. Morelia, México: Comisión Nacional del Agua, CEAC, Gerencia Operativa de la Comisión de Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Cram, S., Galicia, L., & Israde, I. (2010). *Atlas de la cuenca del lago de Cuitzeo: análisis de su geografía y entorno socio ambiental*. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Domínguez, R., Fuentes, G., & Arganis, M. L. (agosto, 2001). *Procedimiento para generar muestras sintéticas de series periódicas mensuales a través del método de Svanidze modificado aplicado a los datos de las presas La Angostura y Malpaso*. Series Instituto de Ingeniería C1-19. Series Blanca. México, DF, México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Fallah-Mehdipour, E., Bozorg, O., & Mariño, M. (June, 2013). Extraction of multicrop planning rules in a reservoir system: Application of evolutionary algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(6).490-498. https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0000572

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Fuentes, O. A., Palma, A., & Rodríguez, K. (2011). Estimación y localización de fugas en una red de tuberías de agua potable usando algoritmos genéticos. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 12(2), 2011, 235-242.

Fuentes, Ó. A., & Palma, A. (2014*).* Leak detection and estimation of its expenses in a network of potable water pipes using a simple genetic algorithm. En: *Memorias*. v2 (pp. 150-155). 4ta. Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática, CISCI 2005 Orlando, Florida, USA.

García, A. R. (2011). *Simulación numérica del transporte de contaminantes, en el río Grande de Morelia* (tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional, México, D.F., México.

Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning.* Boston, USA: Addison-Wesley.

González-Gómez, J. I. (2015). *Toma de decisiones. Excel y Solver, una introducción. Anexo. Curso-taller ASEBOR-2015*. Asociación Empresarial de Bodegas Acogidas a la DO Ribera de Duero, Aranda de Duero, España.

Gotay, S. G., & Jorge, P. M. (2003). Calibración de modelos conceptuales de precipitación-escurrimientos, usando optimización global. *Ingeniería Hidráulica en México*, 10(1), 55-73.

Guzmán, V. H. (2009). *Algoritmos genéticos y Epanet 2.0 para la localización óptima de válvulas reductoras de presión en redes de*

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

distribución de agua potable (tesis de licenciatura para Ingeniería en Computación). Universidad Nacional Autónoma de México.

Holland, J. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. Cambridge USA: MIT Press.

Kang, M. G., & Woo, S. (2014). Combined simulation-optimization model for assessing irrigation water supply capacities of reservoirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 14(5) 1-11. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000726.

Kumar, A. R. S., Goyal, M. K., Ojha, C. S. P., Singh, R. D., Swamee P. K., & Nema, R. K. (2013) Application of ANN, fuzzy logic and decision tree algorithms for the development of reservoir operating rules. *Water Resources Management*, 27, 911-925.

Lasdon, L. S., Waren, A. D., Jain, A., & Ratner, M. (1978). Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear constrained programming. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 4, 34-50.

Lasdon, L. S., & Waren, A. D. (1978). Generalized reduced gradient software for linearly and nonlinearly constrained problems. In: *Greenberg*, H. J. (ed.) (pp. 363-397). *Design and Implementation of Optimization Software*. The Netherlands: Sijthoff & Noordhoff.

López, S., & Sánchez, I. (1998). *Optimización con Solver. Rect@*. Actas_6.1-10.Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/26442934_Optimizacion_con_Solvers

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Malekmohammadi, B., Kerachian, R., & Zahraieb, B. (2009). Developing monthly operating rules for a cascade system of reservoirs: Application of Bayesian Networks. *Environmental Modelling & Software*, 24, 1420-1432.

Michalewicz, Z. (1996). *Genetic algorithms + data structures = evolution program*. Berlin Heidelberg, Germany: Springer Verlag.

Minjares, J. L., Salmón, R. F., Orozco, L. A., & Cruz, I. R. (2008). Hydrologic-agronomic-economic model for the optimal operation of the Yaqui River reservoir system using genetic algorithms. *Ingeniería Hidráulica en México*, 23(3), 37-48.

Moghaddasi, M., Araghinejad, S., & Morid, S. (2010). Long-term operation of irrigation dams considering variable demands: case study of Zayandeh-Rud Reservoir, Iran. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(5). 309-316. Recuperado de https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0000128

Ndiritu, J., Odiyo, J., Makungo, R., Mwaka, B., Mthethwa, N., Ntuli, C., & Andanje, A. (2016). Development of probabilistic operating rules for Hluhluwe Dam, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, (100), 343-352.

OOAPAS, Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. (2018). *Informe anual 2017*. Morelia, México: Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Dirección General.

2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Pereyra, G., Pandolfi, D., & Villagra, A. (2016). Diseño y optimización de redes de distribución de agua utilizando algoritmos genéticos. *Informe Científico Técnico UNPA*, 9(1), 37-73.

Rincón, J. C. (julio, 2006). Aplicación de algoritmo genéticos en la optimización del sistema de abastecimiento de agua de Barquesimeto-Caburade. *Avances en Recursos Hidráulicos*, (14. 25-38). Recuperado de https://www.redalyc.org/pdf/1450/145020399002.pdf

Semarnat, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). *Compendio de estadísticas ambientales 2002. Agua. Capítulo 4*. Recuperado de http://www.paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/

Susperregui, A. S.*Gratiot, N., Esteves, M. Duwig, C. y Prat C.*(2007). *El funcionamiento hidrosedimentario de la presa de Cointzio*. Resumen y Póster. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/282172002_El_funcionamiento_hidro-sedimentario_de_la_presa_de_Cointzio.

Svanidze, G. G. (1980). *Mathematical Modeling of Hydrologic Series*. Fort Collins, USA: Water Resources Publications.

Wua, Y., & Chen, J. (2014). Estimating irrigation water demand using an improved method and optimizing reservoir operation for water supply and hydropower generation: A case study of the Xinfengjiang reservoir in southern China. *Agricultural Water Management*, 116, 110-121.